干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

新疆S214省道防沙体系对近地表风沙流的影响

李生宇[1,2]， 李文明[3]， 孙 熠[4]， 赵淳宇[1,5]， 俞祥祥[1,2]，
王海峰[1,2]， 王世杰[1,2]， 屈 磊[6]

（1. 中国科学院新疆生态与地理研究所国家荒漠-绿洲生态建设工程技术研究中心，新疆 乌鲁木齐 830011；2. 中国科学院大学，北京 100049；3. 新疆生产建设兵团第二师交通运输局，新疆 库尔勒 841007；4. 新疆生产建设兵团第二师交通运输事业发展中心，新疆 库尔勒 841007；5. 新疆农业大学草业学院，新疆 乌鲁木齐 830052；6. 新疆生产建设兵团公路科学技术研究所，新疆 乌鲁木齐 830002）

摘 要：对新疆S214省道台特玛湖干涸湖盆段防沙体系内外的风沙流输沙和风速进行了同步观测，数据分析表明：观测时防沙体系中阻固沙带已拦截了大量风沙，虽近地表风速被削弱程度不大，但风沙流输沙的43.26%仍可被防沙体系所拦截和固定，而剩余部分则可借助路侧输沙带的较大风力输移到公路下风侧，且不产生路面沙害，表明阻-固-输结合型防沙体系非常适宜单风向强风沙环境。S214省道防沙实践可为其他强风沙环境公路防沙提供重要借鉴经验。

关 键 词：强风沙环境；防沙体系；输沙带；风沙流输沙；防沙效益

文章编号：

风沙灾害影响基础设施安全、生态环境质量及人体健康，是风沙地区经济社会发展的重要威胁。新疆是新丝绸之路经济带的核心区，也是中国荒漠化和沙化土地面积最大、分布最广的省区，陆路交通线路风沙灾害严重，成为区域经济社会发展的重要限制条件[1-4]。建国以来，中国政府高度重视西部地区交通运输发展，交通线路防沙治沙经验与技术水平得到不断提高，根据不同区域自然条件和风沙环境，创建了以固为主型、阻固结合型、挡风输沙型等多种道路防沙体系结构模式[5]。而随着交通建设地理空间的逐步拓展，道路防沙将面临更加多样和复杂的风沙环境，对风沙防治工作提出了巨大挑战。

台特玛湖干涸湖盆地处塔里木盆地东部，位于新疆维吾尔自治区巴音郭楞蒙古自治州若羌县境内，为塔里木河的尾闾湖，气候极端干旱，多大风，风沙活动频繁，输沙量大，为典型的“风头水尾”地区[6]。新疆S214省道穿越此区域，与当地主导风向近垂直，沿线风蚀沙化严重[7-10]。为根治此公路沙害，中国科学院新疆生态与地理研究所沙漠研究团队联合新疆生产建设兵团，针对区域“强风多沙”的风沙环境特点，设计了阻-固-输结合型防沙体系结构，综合采用机械与植物防沙措施，2018年建立了公路防沙试验示范路段。2020年6月，对试验示范区防沙体系内外的风沙流输沙和风速进行了同步观测，观测数据显示试验示范区防沙体系防护效果优良，表明这种防沙体系模式适合强风沙环境。此防沙经验也可为相似风沙环境地区的公路防沙提供借鉴参考。

1 研究区背景

1.1 研究区概况

新疆S214省道东西横穿台特玛湖干涸湖盆区，全长59.5 km，是连通G315国道与G218国道的捷径，也是新疆生产建设兵团农二师第36团通往外界的唯一道路。公路沿线分布有现代湖区、湖底沙质荒漠区、湖底盐渍荒漠区、湖滨荒漠-绿洲过渡区以

收稿日期：2021-11-15； **修订日期**：2022-01-19
基金项目：中国科学院A类战略性科技先导专项子课题（XDA20030202）；国家重点研发计划政府间国际科技创新合作重点专项（2017YFE0109200）；中国科学院关键技术人才项目资助
作者简介：李生宇（1975-），男，博士，正高级工程师，主要从事风沙地貌与风沙灾害防治研究. E-mail: oasis@ms.xjb.ac.cn

及绿洲区5种下垫面类型，风沙危害路段主要位于K4+900—K18+200，属沙质荒漠区(图1)。

区域气候极端干旱，降水稀少且蒸发量大，湖相沉积物结构疏松且干燥，沙源丰富，风季为6—9月，主导风向为ENE、NE、E，与公路走向(WNW—ESE)近垂直，偶有反向风[8,11]。该区下垫面粗糙度均值为0.0048 m，临界摩擦速度为0.2423 $m\cdot s^{-1}$，2 m高临界起沙风速为3.65 $m\cdot s^{-1}$[11]；起沙风的平均风速可达7.41 $m\cdot s^{-1}$，年输沙势和合成输沙势分别为362.75 VU、324.71 VU，其中ENE向起沙风输沙势占74%，且主要集中在4—10月[7]；地形平坦，沙丘移动快速。公路沙质荒漠路段风沙灾害严重，路面多积沙和沙埋，威胁车辆行驶安全，甚至导致交通中断，严重制约区域经济社会发展[12]。

1.2 公路防沙体系

为了防控S214省道风沙灾害，当地路政部门曾在公路上风(东北方向)侧建设了机械防沙体系，防沙体系采用常用的阻固结合结构(1 m高芦苇阻沙栅栏和1 m×1 m芦苇草方格固沙带)。由于区域风沙活动极为强烈，防沙体系快速失效，出现栅栏沙埋、倒伏和破损以及草方格全埋或风蚀现象[3]。防沙体系几经更新，公路风沙灾害却愈加严重。研究发现，阻固结合型防沙体系不适合"强风多沙"地区，同时草方格固沙增强了路侧地形起伏度，风影积沙可演变为流动沙丘，并前移压埋道路。总结以往防沙教训，综合采用机械与植物防沙，设计了阻-固-输结合型防沙体系，公路上风侧宽204 m，下风侧宽30 m[8]。在公路上风侧，防沙体系最外侧设立3条芦苇阻沙栅栏，栅栏间距15 m，在其中种植抗逆性强的沙生灌木；与阻沙带相邻，铺设100 m宽的行列式半隐蔽芦苇沙障，间距为1 m，并在其中种植具有经济效益的沙生植物，形成固沙带；在公路路基两侧平铺砾石或设置隐蔽式芦苇沙障，形成输沙带(上风侧宽50 m，下风侧宽30 m)，以使风沙流顺利通过，防止路面积沙[13-14]。2018年，在公路受灾最严重区段建立了防沙试验示范区(图2)。

2 研究方法

2.1 观测设置

2020年6月，在防沙试验示范区，垂直防沙体系(沿主风向)设置4个风沙观测点(图3)，分别位于第1条芦苇阻沙栅栏上风侧50 m处的天然流沙地(1号点)、第3条芦苇阻沙栅栏的沉沙带中部(2号点)、公路上风侧输沙带中部(3号点)、公路下风侧输沙带中部(4号点)。每个监测点布设1个高20 cm的10口方孔阶梯式集沙仪，集沙仪采集高度由低到高依次为2 cm、4 cm、6 cm、8 cm、10 cm、12 cm、14 cm、16 cm、18 cm、20 cm，每个收集孔尺寸均为2 cm×2 cm。同时，在每个观测点布设1 m高自计风速仪1

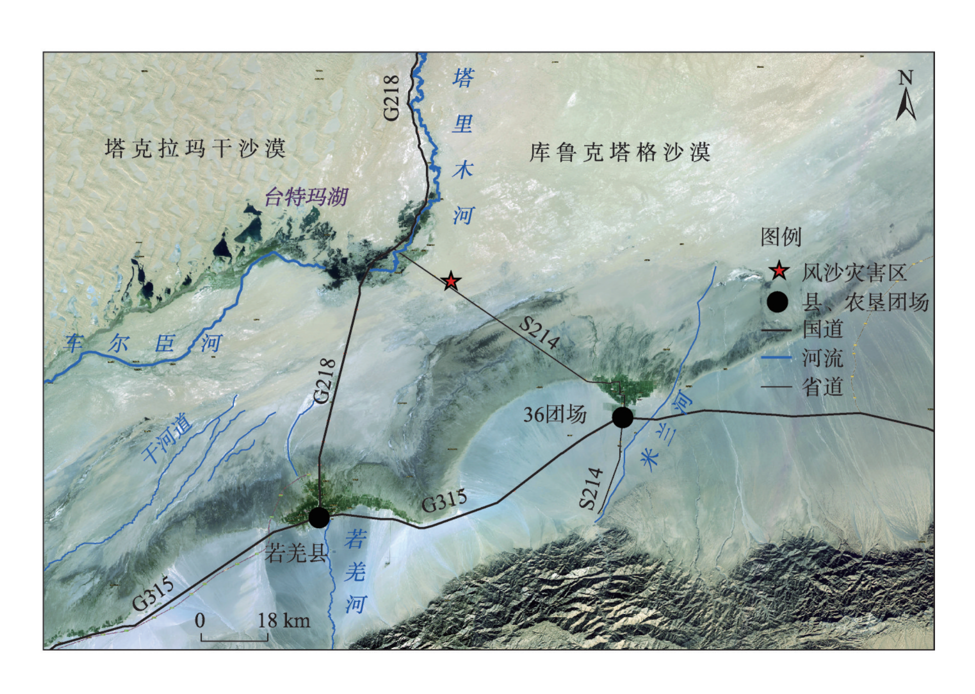


图1 S214省道及其风沙灾害路段位置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of Provincial Highway S214 and its sand disaster section

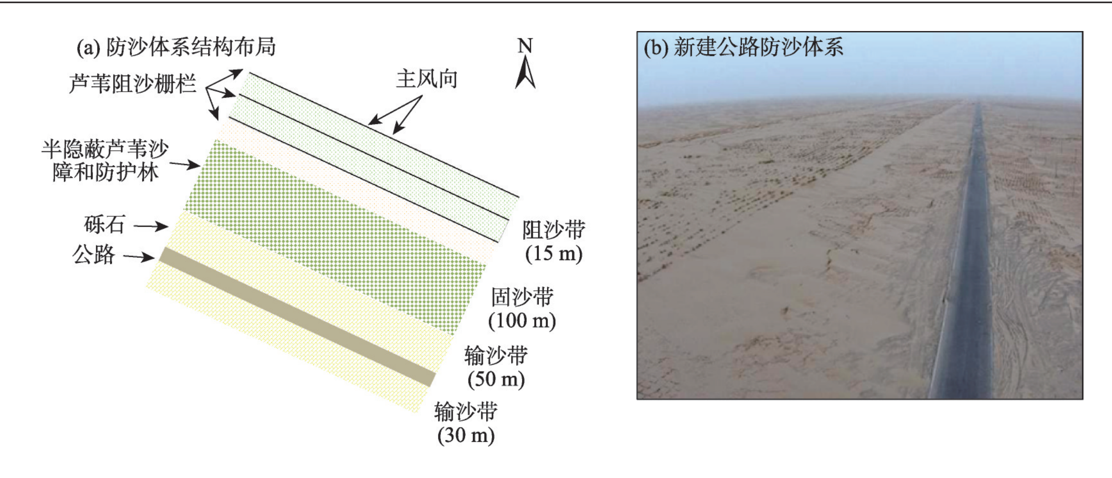


图2　试验区公路防沙体系结构

Fig. 2　Structure of highway sand control system in the pilot site

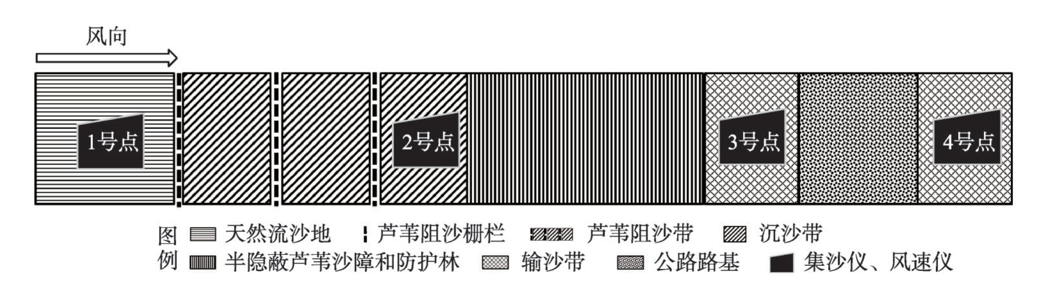


图3　风沙观测点布置图

Fig. 3　Layout diagram of aeolian sand observation points

个，观测间隔为1 s。

观测期间为当地盛行的主导风向(ENE)，地表沙粒活动明显。对近地表的风沙流输沙和风速进行了6次同步观测，每次观测时长30~68 min，始终保持集沙仪最下层集沙管未集满。每次记录观测起止时间，观测结束后，将集沙仪各层集沙管取出，沙样倒入塑料密封袋，袋上标记样品采集时间、位置和高度信息。

2.2　研究方法

(1) 风速变化

根据观测时段的风速记录，计算各测点6次观测的平均风速。以1号点的平均风速为参照风速，计算其余测点风速与此参照风速的比值(%)，得到各测点平均风速的变化率。

(2) 输沙率变化

在室内用百分之一精度的电子天平，称量集沙仪各高度收集样品的质量。计算集沙仪每次、每个观测高度的输沙量及输沙率(单位宽度、单位时间的输沙量，单位为$g \cdot cm^{-1} \cdot min^{-1}$)，各层输沙率之和即为此观测点的输沙率，再计算各测点6次观测输沙率的平均值。

(3) 风沙流结构

半固定沙地的输沙率一般随高度呈指数函数或者幂函数关系变化[式(1)][15-21]，但也随着区域、下垫面条件及天气状况而变化，而固定沙地一般服从多项式关系[式(2)]，但拟合程度不高，没有明显规律[15,22]。对各测点集沙仪10个高度的水平输沙通量进行拟合，公式如下：

$$q(x) = a(x)^b \quad (1)$$

$$q(x) = ax^2 + bx + c \quad (2)$$

式中：$q(x)$ 为某一高度范围的输沙量($g \cdot cm^{-2}$)；x 为沙物质所在集沙仪采集层的高度(cm)；a、b、c 为拟合系数。

(4) 风沙流特征值

根据风沙流结构函数，计算0~10 cm各高度的风沙流输沙量，根据吴正提出的判断地表蚀积状况的风沙流特征值的计算公式[式(3)][23]，计算得到各测点的风沙流特征值(λ)，公式如下：

$$\lambda = \frac{Q_{2\sim10}}{Q_{0\sim1}} \quad (3)$$

式中：$Q_{0\sim1}$ 为0~1 cm高度层内风沙流的输沙率(g·cm^{-1}·min^{-1})；$Q_{2\sim10}$ 为2~10 cm各高度风沙流输沙率的总和(g·cm^{-1}·min^{-1})。当λ>1时，表明下层沙量处于不饱和状态，气流尚有较大搬运能力，有利于吹蚀；当λ<1时，表明搬运沙物质多贴近地面，在地表易形成堆积；当λ=1时为蚀积平衡状态。

3 结果与分析

3.1 平均风速变化

由各测点的平均风速和平均风速变化率(图4)可知，从天然流沙地(1号点)至第3条芦苇阻沙栅栏的沉沙带(2号点)，经过3条阻沙栅栏的拦截和扰动，近地表平均风速由8.05 m·s^{-1}降至7.71 m·s^{-1}，降低了4.22%，表明随着阻沙栅栏前后大量流沙的堆积，其对近地表风速的削弱作用较弱。从2号点(7.71 m·s^{-1})经固沙带到公路上风侧输沙带(3号点，7.73 m·s^{-1})，风速变化不大，说明由于此时固沙带中防沙植物高度还较低，对近地表气流的削弱作用不明显，但也使风速没有大幅增加。气流从3号点经公路路基到达公路下风侧输沙带(4号点)，风速由7.73 m·s^{-1}增加到7.88 m·s^{-1}，4号点风速达到1号点的97.89%，表明平坦光滑的输沙带可使近地表风速快速恢复。

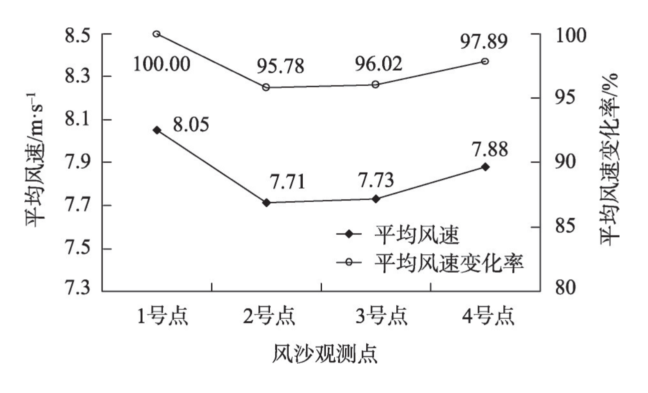


图4 防护体系各测点平均风速和平均风速变化率

Fig. 4 Average wind speed and change rate of average wind speed at each measuring point in the protection system

3.2 输沙率变化

图5为防护体系风沙流输沙率和输沙率变化率，防沙体系上风侧天然流沙地(1号点)的输沙率为1.11 g·cm^{-1}·min^{-1}，至第3条阻沙带的沉沙带(2号点)，输沙率达到1.23 g·cm^{-1}·min^{-1}，增加了10.81%。可见，尽管阻沙带使近地表风速略微降低，但由于栅栏前后堆积了大量流沙，沙源供给充分，风沙流接近饱和搬运，因而输沙率反而增加，并在栅栏背风侧风影涡流区形成卸载堆积[24]。由2号点经过固沙带至公路上风侧输沙带(3号点)，输沙率降为0.63 g·cm^{-1}·min^{-1}，仅为1号点的56.76%，表明受固沙带中半隐蔽芦苇固沙沙障和防护林固沙植物的拦截和固定，地表沙源供给相对不充分，风沙流可搬运沙物质量大幅度降低，一定程度减小了风沙对公路的侵害。由3号点经路基至公路下风侧输沙带(4号点)时，伴随近地表风速的恢复，风沙流输沙率增至0.77 g·cm^{-1}·min^{-1}，达到1号点输沙率的69.37%，可见输沙带使风沙流搬运能力大幅增强。

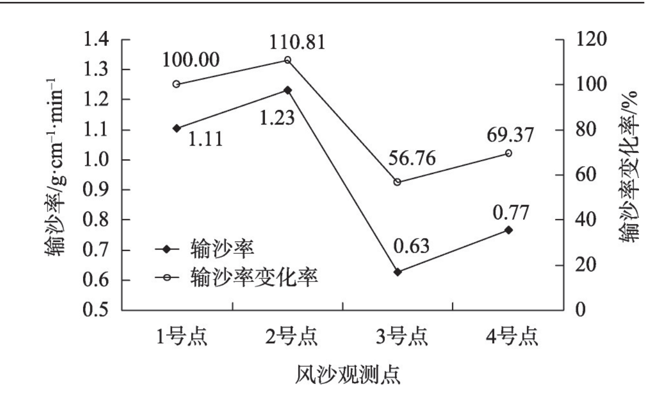


图5 防护体系风沙流输沙率和输沙率变化率

Fig. 5 Variation of sand transport rate and change rate of sand transport rate of the protection system

3.3 风沙流结构变化

图6为各观测点不同高度水平输沙通量拟合曲线，在防沙体系上风侧天然流沙地(1号点)、阻沙带沉沙带(2号点)和公路下风侧输沙带(4号点)水平输沙通量随高度增加而下降，水平输沙通量与高度符合幂函数关系，决定系数R^2都大于0.8。在公路路基上风侧输沙带(3号点)，水平输沙通量虽然也随高度小幅下降，但不符合幂函数关系，仅服从多项式关系，决定系数R^2为0.9467。在相同高度，3号点水平输沙通量远小于1号点和2号点，但随着高度的增加，差异随之减小，在12~20 cm高度层非常接近。

对各观测点风沙流结构(图7)分析发现，1号点和2号点6 cm以下的水平输沙总量分别占总输沙量的61.11%、61.51%，而3号点占比仅为38.22%，4号

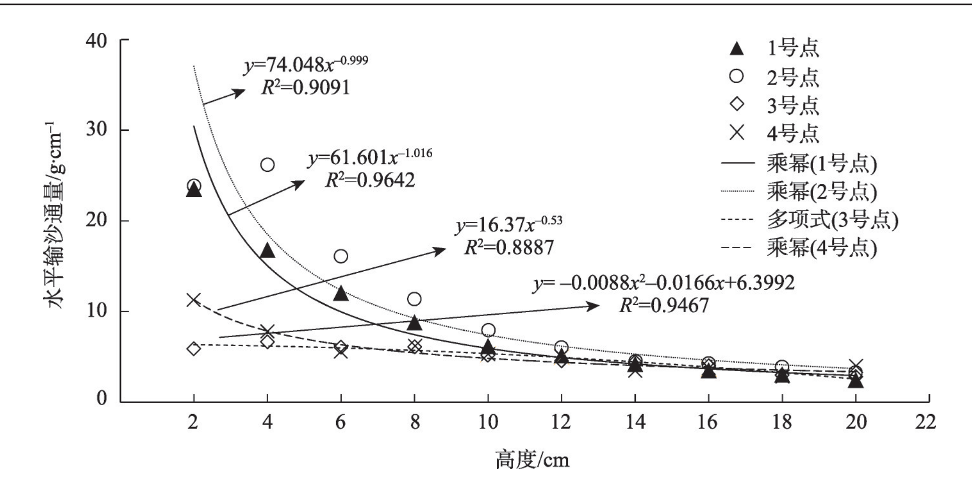


图6 各观测点水平输沙通量的垂直分布

Fig. 6 Vertical distribution of horizontal sand flux of all observation points

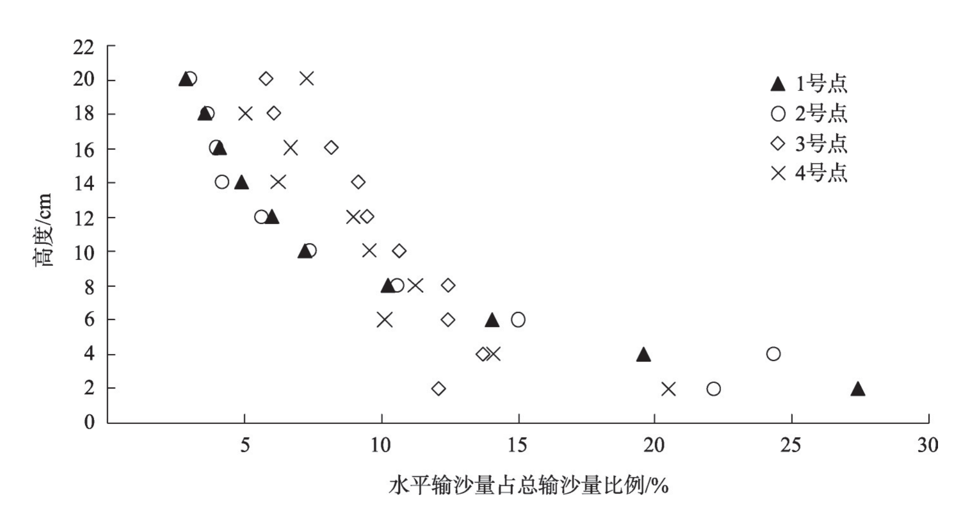


图7 各观测点的风沙流结构

Fig. 7 Wind-sand flow structures of all observation points

点为44.76%；四者在8 cm高度的输沙比例非常接近(1号点10.26%，2号点10.58%，3号点12.44%，4号点11.28%)；在10~20 cm高度层内，3号点(49.34%)和4号点(43.96%)的输沙比例均高于1号点(28.63%)和2号点(27.91%)。表明天然流沙地(1号点)和阻沙带沉沙带(2号点)沙源供给相对丰富，越接近地表风沙搬运量越大，搬运量随高度增加而降低；而在输沙带内(3号点和4号点)，由于半隐蔽芦苇沙障和防护林带具有较好的固沙作用，向输沙带提供的风沙量大幅减少，而且输沙带地表相对平坦，固定较好，有一定的抗风蚀能力，就地风蚀起沙量较少，沙源供给很不充分，因而贴近地表高度层输沙量也很小，上下层搬运量差异不大，呈现出固定沙地具有的风沙流结构特征。

表1 各观测点的风沙流特征值(λ)

Tab. 1 Characteristic values (λ) of sand flow of all observation points

观测次数	1号点	2号点	3号点	4号点
第1次	1.55	1.99	22.11	6.80
第2次	1.90	2.50	20.04	5.05
第3次	1.82	2.95	4.94	9.61
第4次	2.37	4.12	10.01	4.12
第5次	1.86	1.74	10.83	0.82
第6次	2.03	2.36	2.15	7.78
平均值	1.92	2.61	11.68	5.70

3.4 地表蚀积状态变化

由各观测点风沙流特征值(λ)可知(表1)，各观测点各次λ值基本都大于1。1号点λ平均值为1.92，表明该区风力强劲，而天然地表沙源供给相对不

足，地表呈风蚀状态。2号点λ平均值为2.61，可见由于阻沙带对风沙流的拦截，而沉沙带沙源供给相对匮乏，地表也呈风蚀状态。3号点和4号点的λ均值分别为11.68和5.70，远大于1号点和2号点，可见输沙带呈强烈的风蚀状态；4号点λ远小于3号点，说明路基下风侧输沙带沙源供给比上风侧更加丰富。

4 讨 论

在防沙体系上风侧外围设置的芦苇阻沙栅栏是第一道防沙屏障，可以拦截大量流沙，发挥了重要的防风阻沙作用，为固沙带植物生长赢得了时间。防沙措施发挥防护效益的过程也是其防沙能力的衰减过程[25]。随着阻沙带前后的流沙堆积，沙障出露高度逐渐降低，甚至被入侵沙丘全部埋没，部分地段的沙障也产生破损，防护效益相应降低。因此，从防沙体系迎风侧天然流沙地（1号点）到第3条阻沙栅栏的沉沙带（2号点），风速仅有小幅降低；但由于芦苇阻沙栅栏的积沙体提供了丰富沙源，因而近地表风沙流输沙反而出现一定程度的增加（10.81%）。虽然此时芦苇阻沙栅栏还能发挥一定的防沙作用（将入侵沙丘分解为风沙流[26]），但在一般的公路机械防沙实践中，则需要对其进行更新维护[27-28]。

由于研究区风动力强劲，观测时期较大部分的风沙流能穿越阻沙带进入固沙带，并在其中沉积，野外观测时发现半隐蔽沙障内已经形成了较厚的积沙，多数草头出露高度较小（约1~2 cm），加之防护林高度尚较矮（约50~80 cm），防护效益较有限。因此，从第3条芦苇阻沙栅栏沉沙带（2号点）经固沙带到公路上风侧输沙带（3号点），风速变化不大。但由于固沙带较宽，整体拦截风沙能力较强，因此上风侧输沙带（3号点）风沙流输沙率大幅降低，仅为（1号点）的56.76%。1号点、2号点、4号点服从幂函数分布，属低粗糙度下垫面的特点，3号点服从多项式分布，属固定沙地的特点。可见，固沙带和输沙带可以较好控制近地表流沙输移，使风沙流结构（尤其2~6 cm高度）发生显著变化。

在以往沙区公路防沙实践中，多采用阻固结合模式，此前S214省道公路防沙体系也沿用此方法，但防沙体系建成后不足1 a就产生了严重的路面沙害，导致交通中断，虽几经更新和扩大防护规模，但收效甚微。在以上观测中，风沙流经过新设防沙体系的阻-固沙带的变化与在此前防沙体系中基本相同，风沙流如不能有效拦截，将导致公路沙害。实际调查也发现，此前固沙带都直接在原始风沙地貌上设置，而风沙流在固沙带中并非均匀向前推进，而是易于在沙丘等凸起地形的背风坡沉积；随着积沙体的增大，其流动性增强（图8），在风力作用下前移就会掩埋道路[6,8,29]。这是研究区公路风沙灾害形成的主要机制。

在其他地区，虽然公路采用阻固结合模式防沙体系，但公路沙害并不严重，则与其所在区风沙活动较弱有关。考虑到研究区具有极为强烈风沙活



图8 原公路防沙体系路侧沙丘背风坡积沙及沙丘前移上路

Fig. 8 Sand accumulation on the leeward slope of dunes near road in the original highway sand control system and the dunes moving forward to the highway

(a) 输沙带地表机械平整 (b) 输沙带沙面的砾石铺压

图9 公路防沙体系中的输沙带建设
Fig. 9 Construction of sand transport belt in highway sand control system

动，因此形成了阻-固-输结合的防沙体系模式（图2），其主要改进是在常规阻-固结合结构体系基础上，沿公路两侧增加了输沙带。输沙带建设首先要将地表进行机械平整，然后再设置隐蔽式固沙措施或砾石铺压（图9）。输沙带的地形起伏度较小，且地表沙源供给能力下降，可使风沙流以不蚀不积状态搬运通过。从观测数据看出，风沙流经公路上风侧防沙体系的输沙带和公路路基，到达公路下风侧输沙带（4号点），风速逐步恢复，并接近上风侧防沙体系外（1号点）的风速值，近地表风沙流输沙率也较快增加，达到1号点的69.37%。因此，输沙带可以使风沙流呈不饱和状态，能以非堆积搬运形式顺利通过路面，避免了路面沙害发生。

防沙体系中机械沙障的应用迅速提高了研究区对风沙流的拦截能力，防沙植物的种植则可弥补破损机械沙障的功能损失，还可对阻沙带积沙再次运动进行拦截；植被种植和灌溉可以提高土壤的有机质含量与含水率，土壤表层盐分含量增加，提高了地表起沙风速，可降低土壤风蚀[30-31]。根据所在区域土壤水盐特点，防沙植物可选用梭梭、柽柳、白刺、黑果枸杞、沙拐枣等耐盐、耐瘠薄、耐高温、抗逆性强且具有一定经济价值的植物种。防护林植物灌溉水源来自附近的36团，通过以自流输水灌溉防护林[8]。该防沙体系自2018年建成以来，至今未发生路面积沙，公路安全运行，可见阻-固-输结合型防沙体系适宜研究区，能通过输沙带的天然风力将防沙体系不能拦截的流沙输移走。前人也曾提出过阻-固-输结合的防沙体系建设思路，但尚未成功用于防沙实践[32]，而S214省道则是对这种防沙模式的成功实践。2021年，该防沙成果已在S214省道沙害路段全部推广。

5 结 论

综上所述，阻-固-输结合型防沙体系适应台特玛湖干涸湖盆地区的单风向强风沙环境，在阻、固沙带形成大量积沙条件下，还可使近一半的风沙流输沙被防沙体系所拦截固定，防沙体系不能拦截的风沙流输沙可以利用天然风力输移到公路下风侧，从而根治公路沙害。因此，对于强风沙环境地区，可将公路两侧地形平整和固定，建成输沙带，使近路侧风沙流呈不饱和状态，风沙流可自行向下风向搬运，从而实现以有限宽度的防沙体系成功防治公路风沙灾害的目的。这是一种投资少而防沙效果好的防沙体系建设模式，可为其他强风沙环境公路防沙提供参考。

致谢：S214省道防沙工程的施工建设者和公路养护队对本工作提供了多方面的帮助和建议，在此表示诚挚谢意。

参考文献（References）

[1] 马广学, 金海鹏. 试探风沙对公路的危害及防治原则[J]. 才智, 2009, 9(12): 51. [Ma Guangxue, Jin Haipeng. Explore the hazards of sandstorms to highways and the principles of prevention and control[J]. Ability and Wisdom, 2009, 9(12): 51.]

[2] 马维纲. 浅议风沙对公路的危害[J]. 科技资讯, 2011, 9(27): 69. [Ma Weigang. Discussion on the harm of sandstorm to highway[J].

Science & Technology Information, 2011, 9(27): 69.]

[3] 胡正超, 吐尔逊·哈斯木, 王慧玲, 等. 台特玛湖干涸湖盆区S214省道风沙灾害探讨[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2018, 39(6): 48–60. [Hu Zhengchao, Kasi Tursun, Wang Huiling, et al. Wind and sand disasters in S214 provincial highway of dry up lake-basin region of Taitema Lake[J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition), 2018, 39(6): 48–60.]

[4] 刘刚, 高海男. 沙漠地区公路风沙病害分析及处治措施研究[J]. 公路, 2018, 63(4): 57–59. [Liu Gang, Gao Hainan. Study on the analysis and treatment measures of the road wind-sand diseases in the desert area[J]. Highway, 2018, 63(4): 57–59.]

[5] 李生宇, 雷加强, 徐新文, 等. 中国交通干线风沙危害防治模式及应用[J]. 中国科学院院刊, 2020, 35(6): 665–674. [Li Shengyu, Lei Jiaqiang, Xu Xinwen, et al. Patterns of blown-sand hazard control for traffic arteries in China and its application[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2020, 35(6): 665–674.]

[6] 蔡东旭, 李生宇, 雷加强, 等. 考米线风蚀荒漠化区风沙环境及防沙体系探究[C]//中国治沙暨沙业学会2018年学会术年会论文集. 格尔木: 中国治沙暨沙业学会, 2018: 99–109. [Cai Dongxu, Li Shengyu, Lei Jiaqiang, et al. Study on blown sand characteristic and sand hazards comprehensive protection system in wind-eroded desertification area of Kao-Mi highway[C]//Proceedings of the 2018 Annual Conference of China National Sand Control and Desert Industry Society. Golmud: China National Sand Control and Desert Industry Society, 2018: 99–109.]

[7] 胡正超, 刘洋, 李生宇, 等. 台特玛湖干涸湖盆风沙对公路潜在危害评价[J]. 国土与自然资源研究, 2018, 40(2): 54–59. [Hu Zhengchao, Liu Yang, Li Shengyu, et al. The wind-blown sand hazard potential evaluation of highway on dry up lake-basin region of Taitema Lake[J]. Territory & Natural Resources Study, 2018, 40(2): 54–59.]

[8] 蔡东旭, 李生宇, 王海峰, 等. 新疆S214公路台特玛湖干涸湖盆段风沙危害及防治[J]. 中国沙漠, 2020, 40(1): 1–11. [Cai Dongxu, Li Shengyu, Wang Haifeng, et al. Aeolian hazard and comprehensive protection of S214 highway in Taitema Playa, Xinjiang, China[J]. Journal of Desert Research, 2020, 40(1): 1–11.]

[9] 陈柏羽, 程建军, 李生宇. 新疆S214省道高立式芦苇沙障合理间距分析[J]. 干旱区研究, 2020, 37(3): 782–789. [Chen Boyu, Cheng Jianjun, Li Shengyu. Reasonable spacing of high-parallel reed sand barriers along the Xinjiang S214 provincial highway[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(3): 782–789.]

[10] 王雪芹, 雷加强. 风沙活动区工程线路走向与风沙危害程度的关系——以塔里木沙漠公路为例[J]. 干旱区地理, 2000, 23(3): 221–226. [Wang Xueqin, Lei Jiaqiang. Relationship between the alignment of routes and degrees of wind-sand hazard in the drifting-sand region: A case study of Tarim Desert Highway[J]. Arid Land Geography, 2000, 23(3): 221–226.]

[11] 俞祥祥. 台特玛湖干涸湖盆区风沙活动特征[D]. 北京: 中国科学院大学, 2016. [Yu Xiangxiang. Characteristics of blown sand activity on dry up lake-basin region of Taitema Lake[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2016.]

[12] 李生宇, 范敬龙, 王海峰, 等. 315国道策勒恰哈桥段风沙灾害成因初步分析与治理对策[J]. 干旱区地理, 2016, 39(4): 754–760. [Li Shengyu, Fan Jinglong, Wang Haifeng, et al. Causes and thoughts of comprehensive control of blown sand disaster at Qiaha Bridge of National Highway 315, in Cele County, Xinjiang, northwest China[J]. Arid Land Geography, 2016, 39(4): 754–760.]

[13] Sauermann G, Kroy K, Herrmann H J. Continuum saltation model for sand dunes[J]. Physical Review E, 2001, 64(3): 031305, doi: 10.1103/PhysRevE.64.031305.

[14] Andreotti B, Claudin P, Douady S. Selection of dune shapes and velocities Part 1: Dynamics of sand, wind and barchans[J]. The European Physical Journal. B: Condensed Matter and Complex Systems, 2002, 28(3): 321–339.

[15] 毛东雷, 雷加强, 王翠, 等. 新疆策勒县沙漠–绿洲过渡带风沙流结构及输沙粒度特征[J]. 水土保持通报, 2015, 35(1): 25–33. [Mao Donglei, Lei Jiaqiang, Wang Cui, et al. Characteristics of sand flow structure and sand transportation particles in Cele Desert-Oasis Ecotone of Xinjiang Wei Autonomous Region[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2015, 35(1): 25–33.]

[16] 杨东亮, 王雪芹, 胡永锋, 等. 风沙流输沙通量垂向分布研究——以塔克拉玛干沙漠南缘流沙地表风沙流观测为例[J]. 中国沙漠, 2012, 32(3): 631–639. [Yang Dongliang, Wang Xueqin, Hu Yongfeng, et al. Vertical distribution of aeolian sand mass flux based on field observation at southern rim of the Taklimakan Desert[J]. Journal of Desert Research, 2012, 32(3): 631–639.]

[17] 杨兴华, 何清, 霍文, 等. 沙漠地区不同下垫面近地表沙尘水平通量研究[J]. 干旱区研究, 2014, 31(3): 564–569. [Yang Xinghua, He Qing, Huo Wen, et al. Near-surface horizontal sand-dust flux over different underlying surfaces in a desert[J]. Arid Zone Research, 2014, 31(3): 564–569.]

[18] 何清, 杨兴华, 艾力·买买提明, 等. 塔克拉玛干沙漠风蚀起沙观测研究——试验介绍与观测结果初报[J]. 中国沙漠, 2011, 31(2): 315–322. [He Qing, Yang Xinghua, Mamtimin Ali, et al. Observation of dust emission by wind erosion in Taklimakan Desert: Field experiment and preliminary report[J]. Journal of Desert Research, 2011, 31(2): 315–322.]

[19] 边凯, 高君亮, 辛智鸣, 等. 乌兰布和沙漠东北缘绿洲防护林体系防风阻沙能力研究[J]. 首都师范大学学报(自然科学版), 2021, 42(1): 48–53. [Bian Kai, Gao Junliang, Xin Zhiming, et al. Study on wind prevention and sand resistance ability of oasis shelterbelt system in the northeast of Ulan Buh Desert[J]. Journal of Capital Normal University (Natural Science Edition), 2021, 42(1):

48-53.]

[20] 武建军, 何丽红, 郑晓静. 跃移层中沙粒浓度分布特征的研究[J]. 兰州大学学报, 2002, 46(3): 15-21. [Wu Jianjun, He Lihong, Zheng Xiaojing. A study on the characteristics of the concentration profile in saltating layer[J]. Journal of Lanzhou University, 2002, 46(3): 15-21.]

[21] 马世威. 风沙流结构的研究[J]. 中国沙漠, 1988, 8(3): 11-25. [Ma Shiwei. Study on structure of wind-sand flow[J]. Journal of Desert Research, 1988, 8(3): 11-25.]

[22] 代亚亚, 何清, 陆辉, 等. 塔克拉玛干沙漠腹地复合型纵向沙垄区近地层沙尘水平通量及粒度特征[J]. 中国沙漠, 2016, 36(4): 918-924. [Dai Yaya, He Qing, Lu Hui, et al. Dust horizontal flux and grain size characteristics of the near-surface on compound longitudinal dunes in the hinterland of Taklimakan Desert[J]. Journal of Desert Research, 2016, 36(4): 918-924.]

[23] 吴正. 风沙地貌学[M]. 北京: 科学出版社, 1987: 27. [Wu Zheng. Aeolian geomorphology[M]. Beijing: Science Press, 1987: 27.]

[24] 高润清, 党兵, 宋增峰. 风沙运动对高速公路的影响及其防治——以陕西榆靖沙漠高速公路为例[J]. 陕西林业科技, 2007, 35(3): 106-111. [Gao Runqing, Dang Bing, Song Zengfeng. The effect of wind and sand on express highway: The case study of Yulin-Jingbian express highway[J]. Shaanxi Forest Science and Technology, 2007, 35(3): 106-111.]

[25] 姚正毅, 陈广庭, 韩致文, 等. 机械防沙体系防沙功能的衰退过程[J]. 中国沙漠, 2006, 26(2): 226-231. [Yao Zhengyi, Chen Guangting, Han Zhiwen, et al. Decline mechanism and process of mechanical defense system[J]. Journal of Desert Research, 2006, 26(2): 226-231.]

[26] 刘贤万. 实验风沙物理与风沙工程学[M]. 北京: 科学出版社, 1995: 43-50. [Liu Xianwan. Experimental wind-sand physics and wind-sand engineering[M]. Beijing: Science Press, 1995: 43-50.]

[27] GB/T 21141-2007. 中华人民共和国国家标准: 防沙治沙技术规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007. [GB/T 21141-2007. National Standard of the People's Republic of China: Technical regulations for sandification prevention and control[S]. Beijing: Standards Press of China, 2007.]

[28] 苗春平. 机械防沙体系更新养护判定方法[J]. 公路, 2016, 61(4): 221-225. [Miao Chunping. Renewal and maintenance judgment method of mechanical sand control system[J]. Highway, 2016, 61(4): 221-225.]

[29] 张兴鑫, 张凯, 史博源, 等. 流动沙丘区公路路基风沙流场数值模拟及路面沙害形成机制[J]. 干旱区研究, 2021, 38(4): 1184-1191. [Zhang Xingxin, Zhang Kai, Shi Boyuan, et al. Numerical simulation of wind-blown sand flow field and formation mechanism of sand damage on road surface in shifting dune area[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(4): 1184-1191.]

[30] 王佳庭, 于明含, 杨海龙, 等. 乌兰布和沙漠典型植物群落土壤风蚀可蚀性研究[J]. 干旱区地理, 2020, 43(6): 1543-1550. [Wang Jiating, Yu Minghan, Yang Hailong, et al. Soil erosibility of typical plant communities in Ulan Buh Desert[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(6): 1543-1550.]

[31] 王旭, 田长彦, 赵振勇, 等. 滴灌条件下盐地碱蓬(*Suaeda salsa*)种植年限对盐碱地土壤盐分离子分布的影响[J]. 干旱区地理, 2020, 43(1): 211-217. [Wang Xu, Tian Changyan, Zhao Zhenyong, et al. Effects of different planting years of *Suaeda salsa* on the soil ions distribution in saline-sodic soil under drip irrigation[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(1): 211-217.]

[32] 张克存, 屈建军, 鱼燕萍, 等. 中国铁路风沙防治的研究进展[J]. 地球科学进展, 2019, 34(6): 573-583. [Zhang Kecun, Qu Jianjun, Yu Yanping, et al. Progress of research on wind-blown sand prevention and control of railways in China[J]. Advances in Earth Science, 2019, 34(6): 573-583.]

Influence of sand control system on aeolian sand flow near the ground surface in Provincial Highway 214 in Xinjiang Uygur Autonomous Region

LI Shengyu[1,2], LI Wenming[3], SUN Yi[4], ZHAO Chunyu[1,5], YU Xiangxiang[1,2], WANG Haifeng[1,2], WANG Shijie[1,2], QU Lei[6]

(1. National Engineering Technology Research Center for Desert-Oasis Ecological Construction, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, Xinjiang, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Transportation Bureau of the Second Division, Xinjiang Production and Construction Corps, Korla 841007, Xinjiang, China; 4. Transportation Development Center of the Second Division, Xinjiang Production and Construction Corps, Korla 841007, Xinjiang, China; 5. College of Pratacultural Science, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, Xinjiang, China; 6. Highway Science and Technology Research Institute, Xinjiang Production and Construction Corps, Urumqi 830002, Xinjiang, China)

Abstract: Traffic line is an important infrastructure, and aeolian sand activity is a crucial threat to traffic safety. Sand disaster prevention and control is essential for road construction in arid regions. After 1949, China has conducted several road sand disaster control works in arid and semiarid regions and accumulated extensive sand control technology and experience. However, the road sand disaster control in strong wind and sandy areas is less successful than that in other areas. Provincial Highway S214 in the dry lake basin section of Taitema Lake in Xinjiang Uygur Autonomous Region, China is located in such a typical aeolian environment. In recent years, new highway sand prevention projects have been implemented, and the road sand damage has been well controlled. This study investigates the effectiveness of the new sand control system. Synchronous observation of the sand transport via wind flow and wind speed using the sand control system showed that a large amount of aeolian sand was intercepted in the sand-blocking and sand-fixing belts of the sand control system, and the wind speed near the ground surface remained strong. However, 43.26% of the sand transport can still be intercepted and fixed by the sand control system, and the rest can be moved to the downwind side of the highway by the large wind in the sand-transporting belt without damaging the road surface sand. These results showed that the sand control system with its combined resistance and solid transport is suitable for the strong sand environment with unidirectional wind in the Taitema Lake dry lake basin. This aeolian sand prevention practice serves an important reference for highway sand prevention in other areas with strong aeolian environment.

Key words: strong aeolian environment; sand control system; sand-transporting belt; sand flow transport; sand control benefit